

УДК 551.1/.4

МЕХАНИЗМ БАЗАЛЬТОВЫХ ВЗРЫВОВ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

© 2010 г. А. Ю. Озеров

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9; E-mail: ozerov@ozerov.ru

Поступила в редакцию 14.12.2009 г.

Для исследования процессов, происходящих при стромболианских извержениях, создан комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений (КАМБИ), его высота 18 м. При конструировании комплекса были учтены соотношения геометрических размеров реальной питающей системы вулкана: отношение диаметра канала к его высоте $\sim 1 : 1000$. Впервые при физическом моделировании были созданы условия поступления движущейся модельной газонасыщенной жидкости в канал, что позволило изучать процессы нуклеации пузырьков, их увеличение, коалесценцию, образование и преобразование газовых структур, кинетические особенности эволюции газовой фазы. В ходе экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне — кластерный, характеризующийся закономерным чередованием плотных скоплений газовых пузырьков (кластеров), разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Показано, что жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный типы режимов закономерно переходят один в другой и представляют собой полиморфные модификации газонасыщенных жидкостей, движущихся в вертикальных каналах. Полученные данные позволили предложить новую модель газогидродинамического движения магматического расплава в подводящем канале: в зависимости от типа газогидродинамического режима в жерле, в кратере будут проявляться различные типы взрывной активности вплоть до реальных взрывов.

Объектом исследования выбран наиболее часто встречающийся на базальтовых вулканах тип вулканической активности — стромболианский [Лучицкий, 1971; Влодавец, 1984].

Стромболианский взрыв — это мощное, резкое и, как правило, неожиданное событие. Взрывы происходят в ходе вершинных, побочных и латеральных извержений. Раскаленные вулканические бомбы в виде веера или вертикального султана выбрасываются на высоту десятки—сотни метров (рис. 1а), облака пепла достигают высоты сотни, реже тысячи метров, а затем в виде эруптивных шлейфов разносятся ветром на десятки километров. Взрывы обычно кратковременны: время продолжительности активной фазы взрыва — секунды—десятки секунд. Далее следует интервал покоя — минуты, десятки минут и иногда часы, затем происходит новый взрыв и т.д. (см. рис. 1б). Такие дискретные взрывы могут происходить на вулканах недели, месяцы, многие годы и порой даже столетия. Взрывная активность может сопровождаться одновременным излиянием лавовых потоков или происходить без них. При взрывах средней мощности на поверхность выбрасывается 30–50 т твердых магматических продуктов, при сильном — 250–1000 т (см. рис. 1а). Стромболианские эксплозии часто генерируют ударные волны.

Поскольку нет однозначного объяснения причин стромболианских взрывов и их разнообразия, мы провели цикл экспериментальных исследова-

ний, которые позволили понять механизм стромболианской активности. В 2002 г. были начаты лабораторные эксперименты с двухфазными смесями. За пять лет было сконструировано девять газо-гидродинамических экспериментальных установок. В итоге создан комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений (КАМБИ) и проведена серия экспериментальных работ. При создании установки учитывались соотношения параметров реальных подводящих магматических систем на примере Ключевского вулкана.

Цель исследований — выявление причин возникновения дискретного режима извержения базальтовых магм. Основной метод — экспериментальное изучение кинетики двухфазных смесей в вертикальных трубах (от момента зарождения первых газовых пузырьков до появления зрелых стабильных газовых структур) и сопоставление полученных данных с реальными вулканическими событиями. В экспериментальной трубе моделировались процессы, происходящие в магматическом канале, а на верхнем срезе трубы — эруптивные эффекты в жерле вулкана.

В ходе экспериментов, при движении газонасыщенной жидкости по вертикальной колонне, изучалось изменение структуры модельной жидкости. Описаны последовательно возникающие четыре газогидродинамических режима — жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный. Особое внимание было уделено ранее неизвестному режиму,

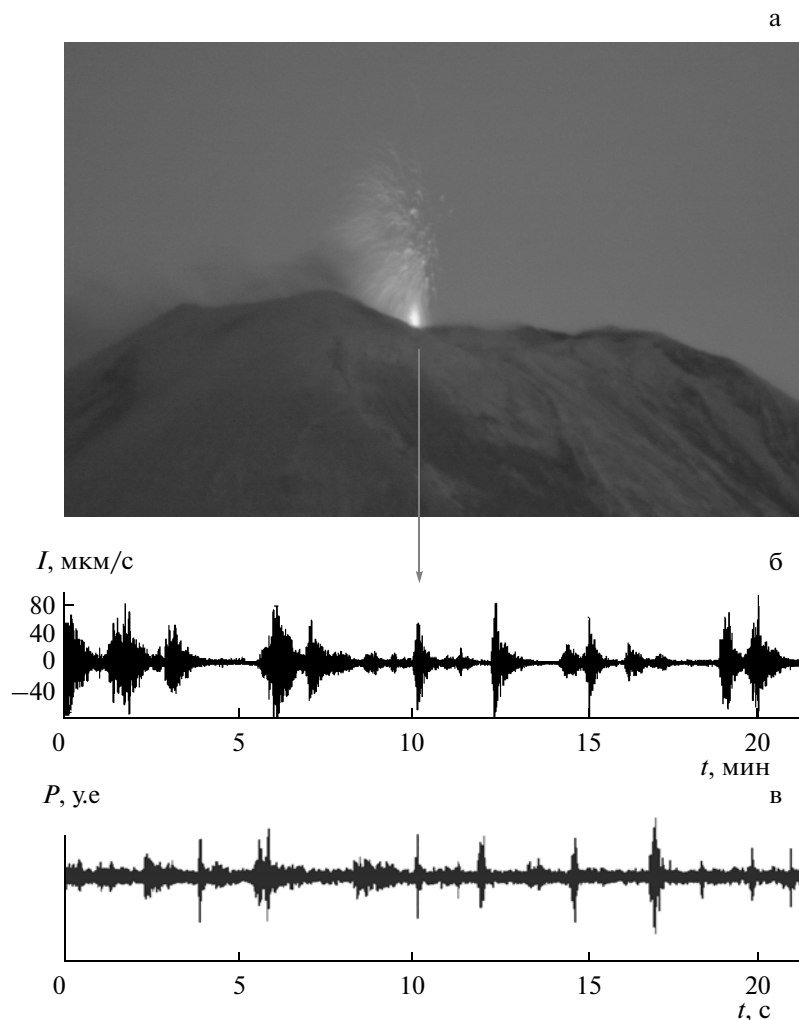


Рис. 1. Сопоставление особенностей взрывной активности вулкана Ключевской с характером проявления снарядного режима на поверхности по результатам экспериментальных исследований на КАМБИ.

а — взрыв в вершинном кратере вулкана Ключевской 23 марта 2007 г. (08 ч 14 мин 30 с; GMT). Вид с севера. Максимальная высота выброса бомб — 230 м. Объем выброшенного магматического материала ~500 т (минимальная оценка). Съемка выполнена с расстояния 32 км. Фото Ю.В. Демянчука;

б — фрагмент сейсмической записи взрывной активности вершинного кратера вулкана Ключевской, 23 марта 2007 г. (начало записи 08 ч 04 мин 30 с; GMT); по оси абсцисс — время, t (мин), по оси ординат — скорость смещения грунта, I (мкм/с). Регистрация проводилась на сейсмостанции Логинов в 12 км от кратера. Данные Камчатского филиала Геофизической службы РАН. Стрелкой показано сейсмическое событие, сопровождающее взрыв; в — фрагмент акустической записи всплесков снарядного режима модельной жидкости на верхнем урезе экспериментальной колонны КАМБИ; по оси абсцисс — время, t (сек), по оси ординат — давление звуковой волны, P (у.е.). Регистрирующий микрофон расположен на расстоянии 20 см от верхнего среза шланга.

связывающему пузырьковый и снарядный режимы. Это новый, морфологически устойчивый газогидродинамический режим — кластерный. Описан механизм образования кластеров.

В процессе экспериментов проводилась постоянная запись акустического сигнала в верхней части трубы, где модельная жидкость выходит на поверхность. Акустическая запись снарядного режима сопоставлена с сейсмограммой реального сигнала при извержении Ключевского вулкана.

На основании данных об энергии сильных дискретных вулканических взрывов, вязкости базаль-

товых магм и результатов наших экспериментальных исследований описаны возможные сценарии взрывов базальтовых магм. Представлена классификация типов вулканической деятельности в зависимости от типа газогидродинамического режима.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

В конце XX века в вулканологии сформировался общий подход к пониманию процессов, происходящих в верхних частях питающих систем базальтовых вулканов. Были использованы законы гидродинами-

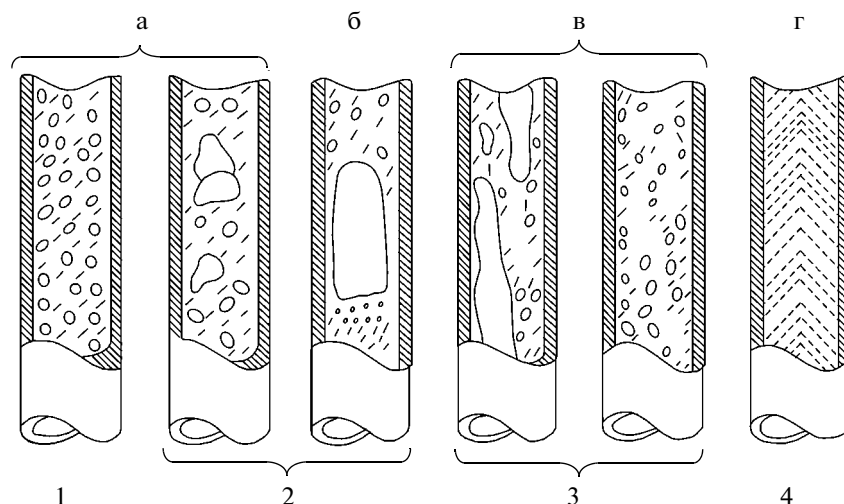


Рис. 2. Соответствие режимов течения двухфазных смесей типам извержений [Дрознин, 1980].

а–г – режимы течения двухфазных смесей: а – пузырьковый, б – снарядный, в – диспергированный, г – дисперсный.
1–4 – типы извержений: 1 – гавайский, 2 – стромболианский, 3 – этно-везувийанский, 4 – вулканский.

ки двухфазных газожидкостных систем, и описаны пять режимов течения двухфазных смесей, происходящих в вертикальных трубах – пузырьковый, снарядный, пенообразный, диспергированный и дисперсный [Козлов, 1955]. Позднее опубликована карта режимов течения газожидкостных потоков в вертикальных трубах [Сорокин, 1963]. Результаты фундаментальных исследований режимов течения двухфазных смесей представлены в обобщающих монографиях [Wallis, 1969; Кутателадзе, Накоряков, 1984].

В 1960 годы появилась серия работ, в которых сделана попытка объяснить природные процессы – базальтовые взрывы с позиции гидродинамики. Одной из первых была работа [Rittmann, 1960]; он обсуждал возможность шлирового группирования пузырьков, поднимающихся в магматической колонне. Прямое сопоставление режимов течения двухфазных смесей с типом извержений вулканов впервые было выполнено В.А. Дрозниным [1969], позже он продолжил свои исследования [Дрознин, 1969, 1980], которые наглядно проиллюстрировал графическим материалом (рис. 2). Эти построения с небольшими изменениями вошли во все вулканологические публикации, связанные с механизмом извержений [Carrigan et al., 1992; Jaupart, 2000; Vergnolle, Mangan, 2000; Privitera et al., 2003]. Обобщающая сводка и анализ работ по приложению законов гидродинамики к природным процессам представлены в работе [Sparks, 1978].

Из изложенного следует, что внешние проявления динамики базальтовых извержений в общем виде достаточно хорошо описываются существующими в гидродинамике представлениями о движении двухфазных смесей по вертикальным трубам. Но вопрос о переходе пузырькового режима в сна-

рядный оставался невыясненным. Известно, что падение давления в газонасыщенной жидкости приводит к выделению газа из растворенного состояния в свободную фазу, т.е. происходит зарождение и образование пузырьков. Также известно, что каждый отдельный крупный пузырь снарядного режима продуцирует на поверхности “взрывоподобный” всплеск. Однако неясно, почему пузырьки объединяются в крупные газовые структуры. Чтобы пузырьки слились, необходимо проделать значительную работу по их сближению и сжатию. Какова природа объединяющих сил. Ответы на эти вопросы, используя известные данные газогидродинамических исследований, вулканологам получить не удалось.

Для решения поставленных вопросов проводились экспериментальные исследования по трем направлениям. Первое – экспериментальный поиск новых эффектов во взаимоотношениях газ–жидкость, а затем, в случае их выделения, учет обнаруженных явлений при создании концепции работы питающей системы вулкана. Второе направление – моделирование структурных изменений двухфазного потока при его переходе из широкого “магматического очага” в узкий “подводящий канал”. Третье направление – изучение процессов эволюции двухфазного потока в длинной тонкой вертикальной трубе – “подводящем канале”.

Первое направление экспериментальных исследований отражено в работах [Manga, Stone, 1994; Manga, 1996]. Выявлены новые эффекты в системе газ–жидкость. Показано, что возможно объединение/слияние свободно всплывающих пузырьков, а в неподвижной жидкости может происходить расслоение пенных структур. Несмотря на изящество выполненных работ, следует отметить, что экспери-

менты, на которых основывались последующие теоретические построения, были проведены в идеальных условиях: 1) в неподвижной жидкости; 2) на коротких вертикальных интервалах; 3) без учета воздействия краевых (пристеночных) эффектов. Полученные данные оказались недостаточными для создания целостной картины эволюции высокостатического двухфазного потока, соответствующего поднимающемуся к поверхности магматическому расплаву.

Второе направление развивалось С. Верниолли, К. Джапартом [Vergniolle, Junpart, 1986, 1990]. Ими предложена междисциплинарная теория дискретного взрыва/фонтанирования — своеобразный синтез структурной вулканологии и газогидродинамики. Основой их модели, объясняющей причины дискретного взрыва/фонтанирования, является наличие крупного промежуточного очага, который соединяется с поверхностью тонким подводящим каналом; диаметр очага в сотни—тысячи раз больше диаметра канала. Поднимающийся сквозь жидкость поток газовых пузырьков встречает на своем пути преграду в виде свода магматического очага; под этим сводом пузырьки накапливаются, трансформируются в пену и затем отдельными порциями поступают в подводящий канал. Порционное появление в жерле газовых пузырьков приводит к вулканическому взрыву или эпизоду фонтанирования. Таким образом, С. Верниолли и К. Джапарт вводят обязательный структурный барьер (свод промежуточного очага), который работает как накопитель-дозатор газовой фазы. Многие исследователи для объяснения особенностей дискретного поступления вещества в процессе вулканических извержений в той или иной степени использовали вулканологическую модель С. Верниолли и К. Джапарта [Carrigan et al., 1992; Chouet et al., Delfa et al., 2001; Privitera et al., 2003].

Но для Ключевского вулкана — типичного базальтового вулкана, к тому же детально изученного, модель Верниолле-Джапарта неприемлема. Во-первых, по сейсмологическим и петрологическим данным в его питающей системе нет близповерхностного магматического очага [Горшков, 1956; Фирсов, Широков, 1971; Балеста и др., 1976; Горельчик, 1976, Utnasin et al., 1976; Гордеев и др., 1986; Федотов, 1993, 2006; Федотов и др. 1988; Арискин и др. 1995; Озеров и др., 1996, 1997; Ozerov, 2000; Хренов и др., 2002; Lees et al., 2007]. Во-вторых, в динамике извержений Ключевского вулкана установлено несколько групп устойчивых периодичностей, значительно отличающихся друг от друга: $T_1 = 1 \text{ мин } 34 \text{ с}$, $T_2 = 6 \text{ мин } 10 \text{ с}$, $T_3 = 40 \text{ мин}$, $T_4 = 5 \text{ ч } 30 \text{ мин}$, $T_5 = 36 \text{ ч}$ [Конов, Озеров, 1988; Ozerov, 2004; Ozerov, Konov, 1988; Ozerov et al., 2007]. Если использовать модель С. Верниолли и К. Джапарта то, с учетом периодичностей в динамике извержений

вулкана, необходимо предположить существование нескольких магматических очагов, значительно отличающихся по своим размерам. Причем каждый очаг должен иметь свой питающий канал, напрямую сообщаемый с вершинным кратером. В рамках известных газогидродинамических построений и модельных исследований С. Верниолли и К. Джапарта объяснить эти противоречия не представляется возможным.

Автором было избрано третье направление — исследование газогидродинамических эффектов, возникающих в протяженных вертикальных трубах. Для физического моделирования процесса извержения была сконструирована специальная лабораторная экспериментальная установка КАМБИ [Озеров, 2007]. На установке проводилось комплексное моделирование эффектов, возникающих в вертикальной трубе при движении газонасыщенной жидкости, а не фрагментарное изучение отдельных режимов двухфазных смесей, как это осуществлялось в предыдущих работах. Кроме того, исследовался характер проявления каждого отдельного режима на верхнем срезе трубы. В трубе моделировались процессы, происходящие в магматическом канале, а на верхнем срезе трубы — эруптивные эффекты в кратере (жерле) вулкана.

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

При создании установки мы стремились максимально учесть соотношения параметров реальных питающих магматических систем; за основу принят Ключевской вулкан. Из литературных данных по Ключевскому вулкану были выбраны наиболее характерные параметры его подводящей системы. Кроме того, мы старались избежать любых возможных структурных и энергетических барьеров, способных повлиять на характер движения вещества. Ниже приводятся основные положения, которыми руководствовался автор при конструировании лабораторной установки (1–10 положения) и проведении экспериментальных исследований (11–14 положения): 1 — равномерное поступление магматического расплава в подводящую систему (канал); 2 — магматический расплав, поступающий в нижнюю часть подводящего канала, однородный, без изменения вязкости; 3 — сечение канала круглое или овальное; 4 — стенки канала упругие, не создающие каких-либо вибраций, способных вызвать резкие изменения в характере движения расплава; 5 — высота питающего канала в сотни-тысячи раз больше его диаметра; 6 — подъем магмы по колонне осуществляется вертикально вверх, в нижней части потока четко проявляется ламинарный характер течения; 7 — расплав, поступающий в нижнюю часть подводящего канала, не содержит свободной газовой фазы; 8 — при подъеме

расплава по каналу, вследствие падения давления, происходит образование пузырьков (нуклеация) и последующее увеличение их размера; 9 — вязкостные свойства расплава таковы, что газовые пузырьки движутся существенно быстрее жидкой фазы; 10 — в верхней части канала отсутствуют запирающие пробки из затвердевшего магматического вещества, способные повлиять на поведение двухфазного потока при выходе его на поверхность (система открытая); 11 — однофазная двухкомпонентная модельная жидкость (вода с растворенным углекислым газом) в процессе эволюции превращается в двухфазную двухкомпонентную систему ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$). Это существенно отличает наши эксперименты от предыдущих исследований с однокомпонентными системами, где жидкость и газ представляли разные физические состояния одного и того же химического соединения (например, вода—пар); 12 — в экспериментах мы сознательно пренебрегали третьим компонентом, кристаллической фазой, обычно присутствующей в магматических расплавах, так как ее доля в базальтовых расплавах незначительна (кроме того, не изучив полный спектр взаимоотношений газ—жидкость, переходить к более сложным системам нам представлялось преждевременным); 13 — моделирование проводилось для извержения, вступившего в зрелую фазу в сформированном магматическом канале; эффекты, связанные с фазами подготовки и окончания извержения, не рассматривались; 14 — эксперименты проводились со слабогазонасыщенной модельной жидкостью (давление до 2 атм.) при температуре $\sim 20^\circ\text{C}$. Получение режимов со значительными расходами газа (кольцевых, диспергированных и дисперсных) не планировалось.

КАМБИ смонтирован в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, его общая высота — 18 м. Установка состоит из двух систем — моделирующей и регистрирующей. Идея, расчеты, изготовление всех узлов и монтаж КАМБИ осуществлены коллективом сотрудников Института. Руководитель работ — ведущий научный сотрудник А.Ю. Озеров, инженеры — А.В. Буткач, В.С. Шульга, О.И. Дьячкова, токарь-фрезеровщик — С.Ф. Лактионов; советы и консультации — ведущий научный сотрудник В.А. Дроздин.

КАМБИ создан для изучения механизма вулканических процессов. Поэтому для удобства последующего обсуждения результатов экспериментальных исследований названия составляющих модельной системы условно приближены к терминам вулканической системы.

Моделирующая система включает емкость для приготовления газонасыщенной модельной жидкости (магматический очаг), прозрачный шланг (питающий канал), аквариум для приема поступаю-

щей модельной жидкости (кратерная область/жерло) (рис. 3а, 3б). Описание магматической системы приводится снизу вверх.

“Очаг”. Сконструирован экспериментальный аналог магматического очага, из которого однофазная жидкость с растворенным газом поступает в питающий канал. “Очаг” представляет собой толстостенный герметичный бак из нержавеющей стали высотой 2.3 м и объемом 350 л. Бак рассчитан на давление до 5 атм. С помощью системы вентилях установка заполняется жидкостью. Для насыщения жидкости газом в нижнюю часть бака вварена перфорированная трубка с 50 отверстиями. Давление в системе измеряется манометром, находящимся в верхней части бака. Водомерная колонка, расположенная вдоль бака по всей его высоте, позволяет следить за объемом жидкости в баке. В верхнюю часть бака вварен газовый штуцер; через него в бак подается инертный газ, выполняющий в нашем случае роль выдавливающего поршня. Безопасность процесса насыщения жидкости газом обеспечивается аварийным предохранительным клапаном. Эта часть установки является, по сути, сатуратором (устройством, позволяющим растворять газ в жидкости).

В работе используется жидкость (вода) и два вида газа (углекислый газ и азот). Углекислый газ (CO_2) хорошо растворяется в воде (в 1 л H_2O при температуре эксперимента $T = 20^\circ\text{C}$ и давлении в 1 атм. растворяется 828 мл CO_2), кроме того, этот газ достаточно легко переходит/выделяется в свободную фазу [Намиот, 1991]. Азот (N_2) используется в качестве поршня, выдавливающего модельную жидкость из бака. Этот газ практически нерастворим в воде: в 1 л H_2O при температуре эксперимента $T = 20^\circ\text{C}$ и $P = 1$ атм. растворяется лишь 18 мл N_2 [Намиот, 1991]. Оба газовых баллона, подающих CO_2 и N_2 , снабжены редукторами, позволяющими регулировать расход газа.

“Подводящий канал/питающая колонна”. В этой части установки моделируются процессы, происходящие в питающем канале вулкана. Из нижней части боковой стенки бака горизонтально выведена труба из нержавеющей стали, которая, плавно изгибаясь, изменяет направление на вертикальное. Плавный изгиб трубы препятствует образованию турбулентности в потоке. Труба снабжена запирающим шаровым краном, позволяющим регулировать подачу модельной жидкости из бака в пластиковый шланг.

Верхняя часть стальной трубы соединяется с прозрачным пластиковым шлангом, высота (длина) которого 16600 мм, внутренний диаметр 18 мм. Отношение рабочего сечения: внутреннего диаметра шланга к длине (в нашем случае к высоте) приблизительно 1 : 1000. Такое соотношение близко к реальным, характерным для вулканических питающих каналов.

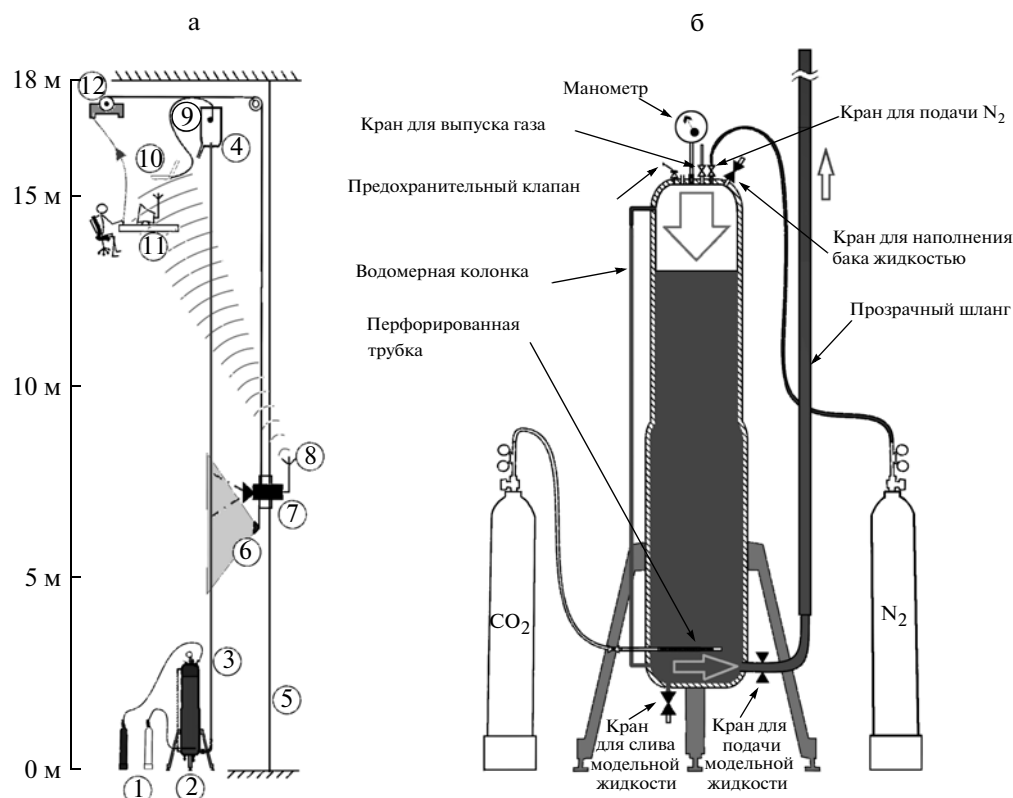


Рис. 3. Комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений (КАМБИ).

а – схема моделирующей (1–4) и регистрирующей (5–12) систем КАМБИ: 1 – газовые баллоны высокого давления с CO₂ и N₂, 2 – герметичный бак для приготовления модельной жидкости, 3 – прозрачный шланг, 4 – аквариум для приема жидкости, 5 – трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения, 6 – источник света, 7 – видеокамера, 8 – передатчик и телеметрическая антенна, 9 – микрофон, 10 – компьютер, 11 – приемник видеосигнала и монитор, 12 – электродвигатель (в верхней части рисунка – оператор); б – блок для приготовления газонасыщенной модельной жидкости и подачи ее в прозрачный вертикальный шланг.

Специальная система крепления позволяет держать шланг в вертикальном положении. Вдоль колонны протягивается мерная лента с ценой деления в 1 мм.

Труба, шаровый кран и шланг имеют одинаковые внутренние диаметры. Это обстоятельство, а также плавный изгиб трубы позволяют сохранить ламинарный характер течения модельной жидкости при перемещении ее из бака в пластиковый шланг.

“Кратерная область/жерло”. Природным аналогом этой части аппаратного комплекса является кратер вулкана или вулканическая бокка. Верхняя часть пластикового шланга введена в прозрачный аквариум прямоугольного сечения, изготовленный из оргстекла. Верхний срез шланга сделан перпендикулярно его оси, он располагается на 200 мм выше дна. Аквариум герметичен и жидкость не попадает за пределы КАМБИ. Аквариум снабжен сливом.

Описанная часть моделирующей системы дает возможность отслеживать процессы, происходящие при переходе жидкости из питающей системы в открытое пространство.

Регистрирующая система включает систему динамического видеослежения, электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующее устройство и отключающую систему (см. рис. 3а).

Система динамического видеослежения предназначена осуществлять наблюдение в режиме реального времени и регистрировать процессы, происходящие в прозрачном вертикальном шланге при движении по нему модельной жидкости. Вдоль шланга по системе направляющих тросов перемещается тележка с видеокамерой. Движение тележки обеспечивается электродвигателем. На тележке установлен мощный источник света, позволяющий обнаруживать даже мелкие неоднородности в движущемся потоке. Изображение, получаемое видеокамерой слежения, по телеметрическому каналу в реальном времени передается на монитор. Оператор, следящий за видеоизображением, используя пульт управления, имеет возможность оперативно изменять скорость движения тележки в интервале от 2 см/сек до 100 см/сек.

Высотомер и спидометр. Для одновременного определения высоты и скорости движущейся тележки создан специальный электронный блок. Он позволяет фиксировать вертикальное положение тележки с точностью до 10 мм с помощью высотомера и определять изменение ее скорости (в интервале от 2 см/сек до 100 см/сек) с помощью спидометра.

Видеорегистрация. Ход эксперимента фиксируется видеокамерой. Она расположена на движущейся тележке и записывает картину эволюции поднимающейся по прозрачному шлангу модельной жидкости. Для удобства наблюдения процессов выбран оптимальный угол захвата изображения, позволяющий записывать видеоряд движущихся пузырьков в 30-сантиметровом интервале высоты.

Акустическая система позволяет регистрировать звуковой сигнал, образующийся при разрушении пузырьков, достигающих поверхности модельной жидкости. Для этого над верхним срезом пластикового шланга устанавливается влагозащищенный микрофон, сигнал от которого в цифровом виде передается и записывается на компьютер. Это аналог геофизической станции, записывающей колебания, возникающие в непосредственной близости от жерла извергающегося вулкана.

Блок синхронизации. Эта часть установки создана для синхронизации видео- и акустического сигналов с точностью до миллисекунд.

Блок экстренного торможения. Установка снабжена устройством экстренной остановки тележки с видеокамерой в случае выхода ее за пределы рабочей зоны.

КАМБИ сконструирован таким образом, что его моделирующая система может работать в двух вариантах: газонасыщенной колонне (в трубу подается модельная жидкость с растворенным газом) и барботажной колонне (в трубу с неподвижной жидкостью через тонкое сопло извне вводится газ, за счет чего в жидкости формируются пузырьки). В барботажном варианте моделирующая система лишена “очаговой зоны”. В этом случае этап пузырьков нуклеации отсутствует, однако можно наблюдать поведение газовой фазы в изначально неподвижной жидкости. Основная часть исследований проведена с использованием газонасыщенной жидкости. Эксперименты в барботажной колонне проведены в небольшом объеме, лишь для сравнения с таковыми в газонасыщенной колонне. Следует особо подчеркнуть, что во всех экспериментах с КАМБИ мы имеем дело с открытой системой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования в газонасыщенной колонне. Приготовление модельной жидкости подразумевает насыщение 350 л воды газом CO_2 . Условия насыщения

контролируются при помощи манометра. В результате предварительных экспериментов было выбрано оптимальное давление растворения — 1.6 технической атмосферы. Такое давление определяет начало выделения газа в свободную фазу нижней части газонасыщенной колонны и в последующем обеспечивает реализацию всех газогидродинамических режимов.

Перед началом эксперимента прозрачный шланг заполняется ненасыщенной газом водой. Этим достигаются стабильные условия на момент запуска системы. Одновременно открываются вентиль подачи азота из газового баллона в бак и шаровой кран подачи модельной жидкости из бака в пластиковый шланг. Азот создает избыточное давление в баке, и поднимающаяся газонасыщенная жидкость выдавливает неgasонасыщенную воду из шланга. Сохраняя низкий расход подачи азота, даем системе стабилизироваться и переходим непосредственно к проведению эксперимента, наблюдая за событиями в прозрачном шланге. Расход газонасыщенной жидкости, поступающей в колонну в процессе каждого эксперимента, сохраняется постоянным.

В ходе экспериментов установлено, что при движении газонасыщенной жидкости по вертикальной колонне на разных интервалах высоты возникают четыре типа газогидродинамических режимов — жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный (рис. 4). Эти режимы стабильны; при неизменном расходе подачи модельной жидкости они (каждый в своем интервале высоты) сохраняются сколь угодно долго. Приведем описание эксперимента, который рассматривается как базовый, когда при скорости подачи модельной жидкости 3–5 см/с в полной мере проявляются все особенности выделенных режимов. Для удобства поинтервального описания процессов, происходящих при подъеме модельной жидкости, будем рассматривать первые 30 см каждого метра, условно аппроксимируя эти события на всю зону в один метр.

Жидкостный режим. Интервал проявления этого режима в вертикальной колонне — 0–4 м (снизу вверх). Модельная жидкость с растворенным в ней газом CO_2 поднимается по шлангу вверх. Это режим ламинарного однофазного течения, поэтому какие-либо неоднородности в потоке отсутствуют (см. рис. 4). Жидкостный режим не имеет пузырьков, весь газ находится в растворенном состоянии. Модельная жидкость гомогенна, поэтому на рассматриваемом участке никакого перемещения в движущейся газонасыщенной колонне не фиксируется. Падение давления приводит к перестройке газонасыщенной жидкости, т.е. создаются условия для выделения газовой фазы.

Пузырьковый режим. Интервал проявления этого режима в вертикальной колонне — 5–12 м (см. рис. 4). Пузырьковый режим возникает в момент

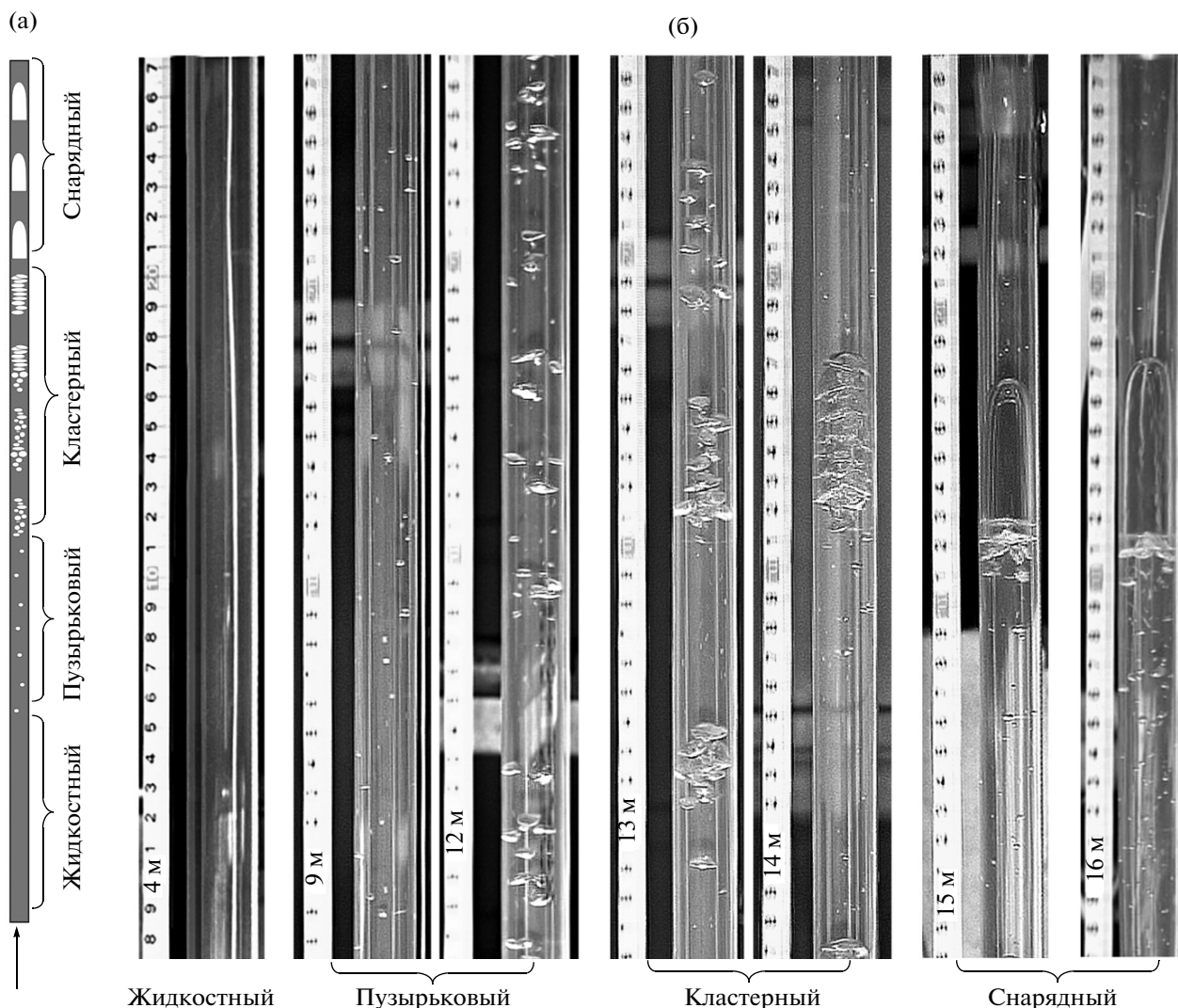


Рис. 4. Фрагменты газогидродинамических режимов, возникающих в процессе подъема газонасыщенной жидкости в вертикальном прозрачном шланге.

а — схематическое положение газогидродинамических режимов по колонне; б — видеокадры режимов течения газонасыщенной модельной жидкости в вертикальном канале. Слева от шланга — мерная лента, с указанием высоты в метрах для каждого кадра. Все кадры последовательно эволюционирующей модельной жидкости получены в ходе одного проезда видеокамеры вдоль колонны со скоростью подъема газовой фазы.

образования первого пузырька. С этого времени в колонне наблюдается двухфазный режим течения модельной жидкости. Переход к пузырьковому режиму почти незаметен. В жидкости зарождаются очень мелкие (<1 мм), едва заметные пузырьки. Сначала процесс нуклеации (зарождения пузырьков) очень медленный; на участках в нижней части колонны (5–7 м) наблюдаются только единичные пузырьки. Затем темп нуклеации возрастает до 60-ти пузырьков на 11-м метре. Зарождающиеся пузырьки имеют размер менее 1 мм по всей колонне. Выше, в зоне перехода в следующий режим, пузырьки, образовавшиеся в нижних частях пузырькового режима, достигают диаметра 7–9 мм. При

движении пузырьки меняются местами, ускоряются, замедляются, увеличиваются в размерах. Слияния пузырьков не происходит. По мере подъема жидкости в ней образуются все новые и новые пузырьки (см. рис. 4). В итоге в верхних частях интервала пузырькового режима наблюдаются несколько генераций пузырьков, точнее плавный переход от мелких (вновь образованных) до крупных (сформированных ранее на более низком уровне колонны).

Распределение пузырьков по колонне: сначала в нижней части колонны — достаточно равномерное, выше, на отдельных участках, образуются сгустки (рои) пузырьков, в то время как другие участки разрежены. Начальная скорость движения пузырьков

25–30 см/с относительно стенок канала, по мере подъема их скорость увеличивается до 40 см/с.

Кластерный режим. Интервал проявления этого режима в колонне — 13–14 м (см. рис. 4). Увеличение количества и размера пузырьков приводит к структурной перестройке газожидкостного потока: расстояние между отдельными пузырьковыми сгустками (роями) заметно увеличивается, а сами сгустки уплотняются. В результате образуются хорошо выраженные рои пузырьков, которые при последующем подъеме модельной жидкости трансформируются в четкие структуры — своеобразные пузырьковые кластеры, состоящие обычно из 20–35, до 50 сближенных пузырьков (см. рис. 4). Кластеры разделяются между собой слоем жидкости, практически не содержащей свободной газовой фазы. Длина кластеров составляет 2–3 диаметра трубки (30–55 мм), межкластерное пространство — 7–9 диаметров трубки (120–160 мм). Одновременно в экспериментальной колонне наблюдается около 10 кластеров, следующих друг за другом на фиксированном расстоянии. Скорость движения кластеров относительно стенок канала ~35 см/с. В зрелом кластерном режиме пузырьки приобретают выпукло-вогнутую форму и как бы вложены друг в друга; возникает своеобразная динамическая плотнейшая газовая упаковка.

Последовательно образуются два вида пузырьковых кластеров (см. рис. 4). В нижней части кластерного режима (13 м) формируются “открытые” кластеры, которые при подъеме вверх превращаются в “блокированные”. Открытые кластеры состоят из пузырьков близкого диаметра; в процессе движения отдельные пузырьки меняются местами, обгоняя или отставая друг от друга. Блокированные кластеры представляют собой совокупность пузырьков, следующих за одним крупным. Морфология блокированных кластеров такова, что на всем своем протяжении они прижаты к внутренней стенке трубки, заполняя практически весь ее диаметр.

Снарядный режим. Интервал проявления этого режима в вертикальной колонне — 15–16,6 м (см. рис. 4). Последующая структурная перестройка двухфазной смеси обусловлена разрывом стенок между пузырьками, плотно прижатыми друг к другу в кластере. В верхней части кластера возникает крупный пузырь (процесс коалесценции идет сверху вниз), и через какое-то время кластер превращается в четко обособленный снаряд длиной в 3–4 диаметра трубки (см. рис. 4). Каждый снаряд занимает практически все сечение канала, он примыкает боковой поверхностью к внутренней поверхности трубки, остается лишь тонкий, практически незаметный, кольцевой зазор для обратного тока жидкости. По отношению к окружающей жидкости снаряды — это крупные газовые полости. По мере подъема продольные размеры снарядов увеличиваются, а также возрастает количество мелких пузырьков, следующих за ними. Но в

целом морфологические изменения снарядов невелики.

Одновременно в колонне наблюдалось около 10 снарядов, движущихся друг за другом на фиксированном расстоянии, что создавало своеобразную структуру типа четок. Достигнув поверхности, снаряд лопался — каждый всплеск модельной жидкости соответствовал выходу на поверхность отдельного снаряда. Это хорошо иллюстрируется акустической записью на КАМБИ (см. рис. 1в). Фоновый уровень сигнала соответствует излиянию определенного объема модельной жидкости, разделяющей газовые снаряды. Скорость движения снарядов несколько выше скорости движения кластеров, около 40 см/с. Снарядный режим — самый устойчивый среди изученных; форма газовых снарядов, их объем и расстояния между ними практически не меняются вплоть до достижения верхней части трубы.

Приведенное описание отвечает условию, при котором давление газонасыщения в баке равно 1,6 атм. и скорость подачи модельной жидкости в вертикальную колонну — 3–5 см/с. При таком давлении газонасыщения проведена серия экспериментов в широком диапазоне скоростей подачи модельной жидкости (от 1 см/с до 10 см/с). Общая структура газогидродинамического потока и процесс перехода одного режима в другой оставались сходными с описанными выше результатами основного эксперимента.

При более низких давлениях газонасыщения газовая фаза выделяется позже, на более высоком уровне колонны, и газонасыщенный поток не может пройти полный ряд всех режимов, полученных в основном эксперименте. При низком давлении (0,3–0,4 атм.) газовая фаза не успевает выделиться из модельной жидкости и на поверхности будет наблюдаться жидкостный режим. Увеличение давления насыщения в баке приводит к тому, что в каждом последующем эксперименте на поверхности появятся все более продвинутые режимы газонасыщенного потока. Таким образом, любой из вышеописанных четырех режимов зависит от условий растворения газа в жидкости и может быть выведен на поверхность, на верхний срез шланга; это позволяет моделировать разные типы вулканических извержений.

Исследование в барботажной колонне. Эксперименты, проведенные на КАМБИ, показали, что в колонне с недвижущейся жидкостью происходят те же эффекты структурирования пузырьков, что и в вышеописанной газонасыщенной колонне. Из равномерно поднимающегося потока пузырьков формируются газовые кластеры, которые в процессе движения трансформируются в снаряды. Таким способом в барботажном варианте реализуется три режима: пузырьковый, кластерный и снарядный.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

I. Результаты экспериментов на КАМБИ существенно дополняют известные газогидродинамические представления, на которых базируются вулканологические построения, связанные с динамикой движения базальтовых расплавов. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

1. впервые была реализована модель, которая учитывала геометрические параметры питающего канала базальтового вулкана. Протяженность реальных вулканических каналов на несколько порядков больше их диаметра, поэтому на КАМБИ отношение внутреннего диаметра канала к его высоте принято примерно 1 : 1000;

2. впервые при физическом моделировании извержений были реализованы условия подъема газонасыщенной жидкости по колонне, что дало возможность наблюдать процесс нуклеации газовых пузырьков, последующее увеличение их размеров, формирование кластеров и снарядов;

3. была обеспечена возможность принудительно равномерного подъема модельной жидкости; исключены различные структурные барьеры и флуктуации скорости подачи газонасыщенной жидкости.

II. В опытах использовалась однофазная модельная жидкость, которая при подъеме по протяженной вертикальной колонне переходит в двухфазную систему (вода—газ). При этом последовательно (снизу вверх) реализуются четыре газогидродинамических режима: жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный, последовательно сменяющие друг друга (см. рис. 3).

Формирование газогидродинамических режимов начинается от момента образования первого пузырька в жидкости и продолжается вплоть до наступления зрелого снарядного режима. Наблюдается четкая эволюционная последовательность: растворенный газ → газовый пузырек → пузырьковый кластер → газовый снаряд; здесь налицо проявление газожидкостного полиморфизма. В современной науке под полиморфизмом принято считать способность или свойство некоторых веществ как простых, так и сложных образовывать в разных термодинамических условиях две или несколько модификаций, характеризующихся одинаковым химическим составом, но различными физико-химическими свойствами. Видоизменения или разные формы одного и того же вещества называются полиморфными модификациями. В проведенных экспериментах показано, что вещество одного и того же состава (вода с растворенным углекислым газом) в процессе эволюции приобретает совершенно разные формы. Таким образом, мы имеем дело с явно выраженным газогидродинамическим полиморфизмом. В этом случае установленные режимы (жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный) следует рассмат-

ривать как полиморфные модификации, общую структуру движущейся жидкости — полиморфным потоком, а сам процесс движения — полиморфным течением.

III. В результате экспериментальных исследований выявлено ранее неизвестное звено, связывающее пузырьковый и снарядный режимы. Это новый, морфологически устойчивый газогидродинамический режим предлагается назвать кластерным (см. рис. 4) Описание такого режима отсутствует как в обобщающих монографиях [Кутателадзе, Накоряков, 1984; Эртель, 2007; Wallis, 1969], так и в публикациях по моделированию работы нефтяных скважин на крупногабаритных установках [Абишев и др. 1981; Сахаров, Мохов, 2004].

Основные характеристики кластерного режима: 1 — главным элементом является пузырьковый кластер — объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков, сверху и снизу ограниченный жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы; 2 — совокупность пузырьковых кластеров, следующих друг за другом на определенном расстоянии, создает кластерный режим, который всегда проявляется между пузырьковым и снарядным режимами; 3 — кластерные структуры в отдельных интервалах колонны имеют устойчивый, повторяющийся характер; 4 — морфологически выделяются кластеры двух видов — открытые и блокированные; 5 — скорость подъема кластеров ниже, чем у крупных пузырьков и снарядов; 6 — продолжительность существования кластерного режима сопоставима со временем существования пузырькового и снарядного; 7 — кластерный режим возникает в широком диапазоне гидродинамических условий: в барботажной колонне (при нулевой скорости движения жидкости и без растворенного газа) и в газонасыщенной колонне (в интервале скоростей жидкости 1–10 см/с); 8 — механизм образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых структур со стенками канала, эффектами самозапираания и торможения.

Автор полагает, что кластерный режим присущ не только вулканическим явлениям. Его следует рассматривать как самостоятельный режим в физике газожидкостных смесей, например: на природных объектах (гидротермальные системы и грязевой вулканизм), при моделировании работы буровых скважин (гидротермальные и нефтяные) и в химической промышленности.

IV. Механизм формирования кластерного режима представляется следующим образом (см. рис. 4). Прообразы (зародыши) будущих кластеров хорошо прослеживаются уже в верхней части участка колонны, для которых характерен пузырьковый режим. Здесь наблюдается неоднородное распределение пузырьков, выделяются сгустки или стяжения, состоящие из отдельных пузырьков. В начале кластерного режима эти обособления становятся более

выраженными. В какой-то момент один крупный пузырек или стяжение более мелких пузырьков начинают взаимодействовать со стенками канала. Последующее увеличение размеров пузырьков приводит к заметному сокращению сечения обратного тока жидкости — кольцевого зазора между газовой структурой и стенками канала. Возникает эффект самозапираания, что обеспечивает торможение движения пузырька или стяжения пузырьков. В результате скорость их снижается, и он (они) становится своеобразной “пробкой” для поднимающихся снизу пузырьков. Последние собираются под “пробкой”, расстояние между ними уменьшается, и в итоге из большого количества пузырьков формируется новая газовая структура — пузырьковый кластер. Пузырьки, располагающиеся в колонне выше формирующегося кластера, продолжают двигаться с прежней скоростью и уходят вверх; таким способом над кластером создается объем жидкости без газовых пузырьков. Под кластером также образуется объем жидкости, лишенный газовых пузырьков, формирующимся на более низком уровне в связи с зарождающимся новым газовым кластером.

V. Превращение кластеров в снаряды происходит в верхней части участка зрелого кластерного режима. Проявляется он только в блокированных кластерах, где пузырьки плотно прижаты друг к другу и примыкают своими боковыми краями к внутренним стенкам канала. При такой плотнейшей динамической упаковке процесс коалесценции неизбежен, и в верхней части кластера из пузырьков формируется более крупный газовый пузырь. Начинается объединение пузырьков (снарядообразование), оно происходит сверху вниз по кластеру, и через некоторое время весь газовый кластер превращается в классический газовый снаряд.

Снарядный режим оказался самым устойчивым в условиях эксперимента. Он может существовать сколь угодно долго и не переходит ни в какой другой. Но в процессе подъема параметры этого режима претерпевают определенные изменения. Так, падение гидростатического давления обеспечивает диффузию газа из модельной жидкости в снаряды, что приводит к увеличению их продольных размеров и возрастанию скорости движения. В нижней части снаряда образуется разряженная зона, о чем свидетельствует вогнутый внутрь (вверх) мениск. Под снарядом усиливается турбулентность модельной жидкости. Отмечается новый этап нуклеации — значительное увеличение количества мелких пузырьков в тыловой части снарядов. Таким образом, в снарядном режиме достаточно устойчиво выделяются два подрежима: начальный — чисто снарядный, когда в тыловой части газовых снарядов практически нет газовых пузырьков, и зрелый снарядный, в котором снаряды сопровождаются шлейфом мелких пузырьков.

VI. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что структурирование газовой фазы вплоть до газовых кластеров и снарядов может происходить в широком диапазоне скоростей и в разных газогидродинамических условиях. На это указывают два варианта экспериментов, проведенных на КАМБИ: при использовании газонасыщенной колонны (скорость движения жидкости от 1 до 10 см/с) и барботажной (газ пробулькивает через неподвижную жидкость). В обоих случаях наблюдалась одна и та же последовательность структурирования газовой фазы: газовый пузырек → газовый кластер → газовый снаряд. Формирующиеся газовые структуры последовательно проходили одну и ту же морфологическую эволюцию. Это свидетельствует о том, что выделенные газовые структуры являются неотъемлемой принадлежностью вертикальных газожидкостных систем и проявляются в достаточно широком диапазоне скоростей. Поэтому можно полагать, что в реальных базальтовых питающих каналах газовая фаза проходит тот же путь структурной эволюции, что и в проведенных нами экспериментах.

VII. Рассмотрено проявление каждого газогидродинамического режима на верхнем срезе трубы, поскольку именно в этой части КАМБИ моделируются процессы, происходящие в жерловой зоне базальтовых вулканов. В зависимости от количества растворенного газа в модельной жидкости любой из описанных режимов может быть выведен на поверхность. Проведено сопоставление поверхностных эффектов каждого режима с реальными динамическими параметрами базальтовых извержений (см. рис. 4, рис. 5).

Жидкостный режим. Газ в свободной фазе отсутствует, происходит равномерное излияние модельной жидкости на верхнем срезе трубы. В природных условиях, в кратерной зоне вулкана, жидкостный режим соответствует спокойному равномерному излиянию лавы (без взрывов).

Пузырьковый режим обусловлен равномерным потоком пузырьков, лопающихся на поверхности жидкости. В процессе базальтовых извержений в зависимости от количества пузырьков, их размера и вязкости магмы проявления этого режима весьма многообразны по характеру и масштабу. В жидких магмах может наблюдаться слабое “кипение” на поверхности лавового озера или слабое фонтанирование в жерле, в более вязких — равномерная постоянная пепловая эмиссия, обусловленная разрывом перегородок между пузырьками, достигающими поверхности. Главной особенностью этого режима является равномерное поступление газовых пузырьков к поверхности в течение длительного времени.

Кластерный режим характеризуется дискретными “всплесками” модельной жидкости на выходе из

Газогидродинамические режимы			Типы эруптивной деятельности в кратере вулкана (при вязкости базальтового расплава $10^3 - 10^5$ Па·с)			
Тип режима	Фазы режима		Равномерное поступление вещества		Дискретное поступление вещества	
	↑ Увеличение содержания газовой компоненты					
Снарядный	зрелый	4б				Сильные бомбовые взрывы, сопровождающиеся выбросом пепла
	начальный	4а			Сильные бомбовые взрывы без пепла	
Кластерный	зрелый	3б			Сильные пеплово-бомбовые взрывы	
	начальный	3а			Слабые пепловые взрывы с небольшим количеством бомб	
Пузырьковый	зрелый	2б		Сильная пепловая эмиссия		
	начальный	2а	Слабое выделение пепла			
Жидкостной		1	Излияние лавы			
	Иллюстрации газогидродинамических режимов по экспериментальным данным (1–4)					

Рис. 5. Классификация типов эруптивной деятельности на базальтовых вулканах в зависимости от газогидродинамических режимов в жерле.

канала, обусловленными появлением пузырьковых кластеров; всплески чередуются со спокойным излиянием модельной жидкости. Проявлением кластерного режима в жидких магмах в кратерной зоне вулкана является квазипериодическое образование надувающих пузырей или всплески дискретных лавовых фонтанов. В более вязких расплавах происходят пепловые выбросы без бомб или с небольшим их количеством (рис. 6а). Образование вулканических бомб обусловлено уменьшением мощности и разрывом верхнего слоя магмы над кластером и разрушением крупных “перегородок” в нем; а мелкая фракция тефры (вулканический пепел) образуется при разрушении тонких стенок более мелких пузырьков, формирующих кластер. В зрелом кластерном режиме эти явления проявляются более энергично и эффектно.

Снарядный режим при выходе из канала характеризуется резкими всплесками модельной жидкости, обусловленными разрывом слоя жидкости над газовыми снарядами, достигшими поверхности. Всплески чередуются со спокойным излиянием или подъемом жидкости по колонне (см. рис. 4). Существуют две стадии снарядного режима: первая, собственно снарядная, когда за газовым снарядом в жидкости практически нет мелких пузырьков, и вторая стадия — снарядно-шлейфовая, когда за снарядом следует устойчивый шлейф мелких пузырьков. Проявление собственно снарядного режима в процессе вулканических извержений в жидких магмах — “выскакивающие” лавовые пузыри (см. рис. 6б) или резкие выбросы жидкой лавы. В более вязких магматических расплавах происходит стремительный разрыв кровли снаряда на поверхности, что приводит к обособленным сильным дискретным выбросам бомб. А в снарядно-шлейфовой стадии выбросы бомб сопровождаются эмиссией вулканического пепла, который продуцируется большим количеством мелких пузырьков, следующих за снарядом.

В кратерной зоне проявления кластерного и снарядного режимов близки (лавовые пузыри, всплески, выбросы бомб, вулканический пепел), но имеются и существенные отличия. Они обусловлены внутренним строением газовых структур. Кластер представляет собой ячеистую пенную структуру, в которой пузырьки отделены друг от друга перегородками; последние создают общий каркас, заполняющий все тело кластера. Газовый снаряд, в отличие от кластера, представляет собой единую газовую полость. По мере выхода кластера на поверхность последовательно происходит многоактный разрыв перегородок. В зависимости от дисперсности пены (размера пузырьков в кластере) на поверхности будут образовываться пепловые или бомбово-пепловые выбросы. Газовый снаряд, в отличие от кластера, представляет собой единую газовую полость и реализуется на поверхности в виде одноактного разрыва верхнего слоя маг-

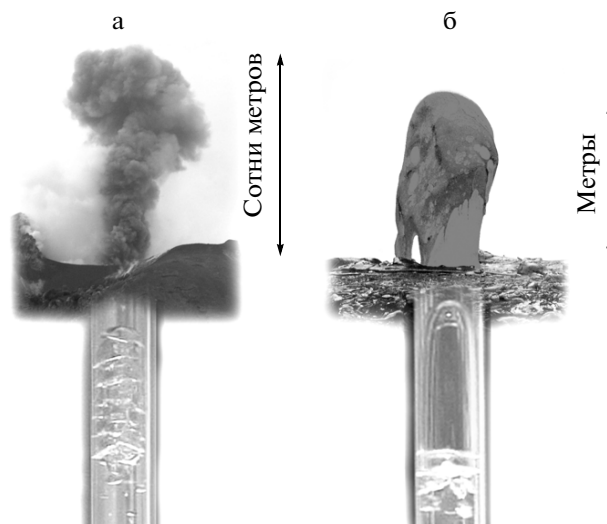


Рис. 6. Модель возникновения explosивных выбросов/взрывов при выходе на поверхность кластерного и снарядного режимов.

В нижней части рисунков — газовые структуры, выявленные в ходе экспериментов на КАМБИ, в верхней части — реальные вулканические события: а — пепловый выброс на вулкане Стромболи, 2004 г., фото А.Ю. Озерова, б — лавовый пузырь [35].

мы; в этом случае формируются в основном вулканические бомбы.

Возникновение кластерного и снарядного режимов приводит к существенному перераспределению потенциальной энергии в магматической колонне; с повышением вязкости расплава при прочих равных условиях значительно увеличивается интенсивность газового импульса вплоть до реальных взрывов.

VIII. Основным критерием любого взрыва в физике считается ударная волна, возникающая в процессе выброса или расширения материала [Политехнический словарь, 1976; Кобылкин и др., 2004]. Ударные волны при извержениях на разных вулканах мира описаны В.В. Адушкиным с соавторами [Адушкин и др., 1984]. На Ключевском вулкане (извержения 1983 и 1987 гг.) и на Толбачинском вулкане (извержение 1975–1976 гг.) они зарегистрированы П.П. Фирстовым, В.В. Адушкиным и А.В. Сторчеусом [Фирстов и др., 1978; Сторчеус и др., 1983; Фирстов, Сторчеус, 1987; Фирстов, 2003]. Используя акустическую регистрацию, они выделили пять типов ударных волн, продуцируемых вулканическими выбросами, считая импульсные сигналы, возникающие при выбросе магматического вещества, ударными волнами низкой плотности. Анализ параметров ударных волн на вулканах Ключевской и Толбачинский позволил определить энергию выброса, которая для слабых взрывов оценена примерно в 10 т тротила, а для сильных в 100 т

тритила. В рассмотренных выше случаях (вулканы Ключевской и Толбачинский) ударные волны наблюдались при вязкости магматических расплавов 10^3 – 10^5 Па·с. Именно при таких значениях вязкости расплава перегородки в кластере или слое магматического вещества над снарядом в условиях подъема в канале еще сохраняют пластичные свойства, но при выходе на поверхность кластера или снаряда при мгновенном высвобождении потенциальной энергии сжатого газа ведут себя как твердое тело, что обеспечивает возникновение ударных волн.

IX. Проведено сопоставление акустической записи снарядного режима на верхнем урезе экспериментальной колонны КАМБИ с сейсмической записью взрывной активности вершинного кратера Ключевского вулкана. На рис. 1б и 1в видно, что экспериментальный и природный сигналы имеют общие черты. В обоих случаях они отражают дискретные, разноамплитудные, квазипериодические процессы. Это позволяет полагать, что газогидродинамические процессы, созданные в экспериментах на КАМБИ и происходящие в реальных магмоподводящих системах, имеют одну и ту же природу.

Стоит отметить, что регистрация событий на вулкане Ключевской и на КАМБИ производилась разными методами: сейсмическим и акустическим соответственно. Обычно цуги взрывов базальтовых магм, записанные этими двумя методами, отличаются друг от друга продолжительностью цуга: цуг акустического сигнала значительно более короткий, чем сейсмический. При этом фоновый сигнал, как правило, невысокий. На КАМБИ более высокий акустический фон (см. рис. 1в) связан с близостью регистрирующего микрофона к источнику звука — урезу трубы, где происходит постоянный излив модельной жидкости; именно она обеспечивает высокий фоновый уровень. Если бы регистрируемые события удалось выполнить сходными методами и уменьшить амплитуду фона текущей модельной жидкости, то сопоставляемые вулканические и модельные записи, несомненно, имели бы большее сходство.

X. С учетом данных об энергии сильных дискретных взрывов, вязкости магм и результатов наших экспериментальных исследований возможны следующие сценарии, описывающие механизм взрывов базальтовых магм (см. рис. 5): 1) слабые пепловые взрывы с небольшим количеством бомб или без них — начальная фаза кластерного режима, 2) сильные пеплово-бомбовые — кластерный режим, 3) бомбовые — собственно снарядный режим, 4) бомбовые, переходящие в пепловые, — зрелый снарядно-шлейфовый режим, сопровождаемый шлейфом мелких пузырьков. Таким образом увеличение количества газовой фазы в потоке приводит сначала к увеличению количества пепла (пузырьковый и кластерный режимы), далее к его уменьше-

нию (снарядный режим) и затем вновь к возрастанию (снарядно-шлейфовый режим). Приведенные данные свидетельствуют о том, что за различные проявления стромболианской активности базальтовых вулканов ответственны различные типы газогидродинамических режимов, возникающих в газонасыщенных расплавах, поднимающихся по протяженной вертикальной колонне.

XI. Результаты исследований по образованию кластерного и снарядного режимов и их сопоставление с натурными наблюдениями на базальтовых вулканах позволяют предложить новое определение одного из базовых понятий вулканологии — взрыва базальтовой магмы.

Взрыв базальтовой магмы — очень быстрое выделение энергии, приводящее к дискретному выбросу на поверхность значительного объема вулканического газа и дезинтегрированного магматического расплава низкой вязкости (10^3 – 10^5 Па·с). Механизм образования крупных обособленных скоплений газа обусловлен комплексом полиморфных газогидродинамических изменений в вертикальной питающей магматической колонне. Вследствие падения гидростатического давления газонасыщенный расплав, поднимающийся по подводящему каналу, проходит четыре режима — жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный. Все они проявляются при извержениях базальтовых вулканов. Проявление в кратере кластерного или снарядного режимов приводит к серии взрывов. Такие взрывы известны на вулканах Ключевской, Толбачинский, Стромболи, Этна, Эребус и др. Во время среднестатистического взрыва базальтовой магмы на поверхность выбрасывается порядка 30–100 т магматического расплава.

Анализируя полученные данные, следует отметить, как ни заманчиво при переходе от модельной установки КАМБИ к реальной питающей базальтовой системе использовать физические уравнения, а также безразмерные величины, как предлагается в работах [Ландау, Лифшиц, 1944; Седов, 1987], выполнить такую задачу на современном этапе весьма затруднительно. Это обусловлено рядом причин, в том числе и тем, что кластерный режим, впервые описанный в настоящей публикации, не имеет еще формализованного описания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для исследования характера движения магматического расплава в питающей системе вулкана создан комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений (КАМБИ). Он предназначен для изучения процессов, происходящих при образовании, подъеме и выходе на поверхность двухфазного газожидкостного потока, движущегося по вертикальному каналу.

2. Анализ разнообразия режимов течения одной и той же модельной жидкости показал, что четыре режима — жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный являются продуктом закономерной эволюции газонасыщенного потока и имеют свои четкие морфологические особенности. Это свидетельствует о структурном газогидродинамическом полиморфизме течения жидкости, а выделенные режимы являются, соответственно, полиморфными модификациями газонасыщенного потока.

3. В ходе экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне — кластерный, характеризующийся закономерным чередованием плотных скоплений газовых пузырьков (кластеров), разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Механизм образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых структур со стенками канала, в результате чего возникают эффекты самозапираания и торможения, и создается относительно медленно движущаяся динамическая газовая пробка — кластер.

4. Комплекс проведенных исследований позволил предложить новую модель газогидродинамического эволюционного движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Реализация на поверхности различных режимов течения двухфазных смесей ответственна за многообразие взрывных явлений в кратере вулкана. В зависимости от проявления типа режима в жерле вулкана может наблюдаться равномерное или дискретное поступление магматического материала: в первом случае — излияние лавы и непрерывная пепловая эмиссия, во втором — пепловые, бомбовые или пеплово-бомбовые взрывы.

5. Анализ причин проявления основных форм взрывов базальтовых магм в жерле вулкана позволил объяснить их с позиции газогидродинамических режимов: 1 — слабые пепловые взрывы с небольшим количеством бомб — начальная фаза кластерного режима, 2 — сильные пеплово-бомбовые взрывы — зрелый кластерный режим, 3 — бомбовые — снарядный режим, начальная фаза, 4 — бомбовые, переходящие в пепловые, — зрелые газовые снаряды, сопровождаемые шлейфом мелких пузырьков.

6. Изучение характера взрывов на базальтовых вулканах, с учетом полученных экспериментальных данных, позволило с новых позиций определить механизм подготовки взрывов базальтовых магм, как процесс газогидродинамического преобразования магматического расплава поднимающегося по вертикальному питающему каналу вулкана.

Автор выражает искреннюю благодарность В.А. Дрознину за многолетнюю помощь в исследованиях. Значительную поддержку в работе оказывали дирекция Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН: академик РАН Е.И. Гордеев, акаде-

мик С.А. Федотов, Я.Д. Муравьев, Г.А. Карпов, Н.И. Селиверстов, В.А. Казанцев, директор КФ ГС РАН В.Н. Чебров, а также И.Р. Абубакиров, Г.П. Авдейко, М.А. Алидибиров, Г.И. Аносов, Ю.А. Бабушкин, А.Б. Белоусов, В.И. Белоусов, Г.Е. Богоявленская, О.Е. Боград, К.А. Бычков, А.В. Буткач, Г.Ф. Васильев, Т.Д. Вислова, М.Г. Гавриленко, А.А. Гаврилов, В.А. Гаврилов, В.И. Гусева, Н.С. Данилевич, Ю.В. Демянчук, О.И. Дьячкова, Д.В. Дроздин, Ю.М. Дубик, Р.Л. Дунин-Барковский, И.К. Дубровская, В.Н. Дубровский, В.И. Дядин, В.В. Иванов (мл.), Я.О. Исполатов, С.В. Касьянов, В.А. Кириченко, А.С. Конов, Д.Ю. Кузьмин, Ю.Д. Кузьмин, А.В. Ландер, В.Л. Леонов, С.Ф. Лактионов, В.С. Лутая, А.П. Максимов, В.К. Марынова, М.А. Мохов, А.А. Мулькеев, А.В. Мушинский, А.Е. Назаров, А.А. Нуждаев, Н.А. Озерова, Н.А. Озерова (мл.), Л.Г. Осипенко, И.Л. Ототюк, В.К. Панов, С.И. Плотников, Э.Г. Пономарев, В.Г. Пушкарев, А.А. Разина, В.А. Рашидов, А.Н. Рогозин, Н.В. Романов, И.Ю. Свирид, С.Л. Сеньюков, В.А. Сергеев, В.В. Сергеев, А.В. Сокоренко, А.В. Сторчеус, И.Ф. Тимофеева, Г.П. Тимошенко, А.П. Хренов, В.Н. Шапарь, В.А. Широков, В.П. Шпак, В.С. Шульга, О.В. Федористов, П.П. Фирстов, Ю.В. Фролова, И.В. Чаплыгин, О.В. Чаплыгин, С.А. Чирков, О.С. Чубарова и В.А. Чуриков.

Большое содействие оказала администрация Камчатского края: заместитель Председателя Правительства В.Н. Карпенко, а также А.А. Гаврилов, Л.А. Грачев, С.И. Кравец.

Автор выражает искреннюю признательность иностранным коллегам за помощь в исследованиях — Дж. Айкельбергеру, Р. Джойлесу, Ф. Кайлу и Дж. Лису.

Большое содействие в процессе подготовки рукописи к печати оказали академик В.И. Коваленко, академик В.В. Адушкин, профессор Ю.Д. Чашечкин, профессор Н.Н. Сысоев, д.ф.-м.н. А.А. Гусев.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 09-05-00841-а и грантом Правительства Камчатского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абишев С.К., Булгаков Р.Р., Сахаров В.А. Экспериментальная установка по исследованию движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах для подъема высоковязких нефтей // Тр. МИНХ и ГП. 1981. Вып. 156. С. 98–104.
- Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных взрывных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
- Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсен Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3. № 5. С. 42–67.

- Балеста С.Т., Иванов Б.В., Утнасин В.К. и др. Строение земной коры района Ключевской группы вулканов, особенности тектоники и вулканизма // Глубинное строение и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток. 1976. С. 6–15.
- Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
- Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Вулканическое дрожание Ключевского вулкана (извержение вершинного кратера в 1984 г.) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 39–53.
- Горельчик В.И. Сейсмические проявления вулканической деятельности // Глубинное строение и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 108–118.
- Горшков Г.С. О глубине залегания магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703–705.
- Дрознин В.А. О природе вулканических извержений // Материалы 1-й городской конференции молодых ученых и специалистов. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное изд-во, 1969. С. 4–6.
- Дрознин В.А. Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
- Козлов Б.К. Режимы и формы движения воздушно-водяной смеси в вертикальной трубе // Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 7–18.
- Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 376 с.
- Конов А.С., Озеров А.Ю. Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 21–38.
- Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 302 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М., Л.: Гостехиздат, 1944. 624 с.
- Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. Т. 1. Современные вулканы. М.: Наука, 1971. 480 с.
- Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде. М.: Недра, 1991. 168 с.
- Озеров А.Ю. Экспериментальный комплекс для моделирования базальтовых взрывов // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога (28–31 марта 2007). Петропавловск-Камчатский. 2007. С. 144–156.
- Озеров А.Ю., Арискин А.А., Бармина Г.С. К проблеме генетических взаимоотношений высокоглиноземистых и высокомагнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // ДАН. 1996. Т. 350. № 1. С. 104–107.
- Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф. и др. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5. № 6. С. 614–635.
- Политехнический словарь. М.: Советская Энциклопедия, 1976. 608 с.
- Сахаров В.А., Мохов М.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. М.: Нефть и Газ, 2004. 392 с.
- Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 431 с.
- Сорокин Ю.Л. Об условиях устойчивости некоторых режимов движения газо-жидкостных смесей в вертикальных трубах // Прикладная механика и теоретическая физика. 1963. № 6. 160–165.
- Сторчеус А.В., Самойленко Б.И. Исследование вулканических взрывов Толбачинского извержения с помощью кино съемки // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 102–106.
- Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
- Федотов С.А. Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 23–45.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И. Деформация и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3–42.
- Фирстов П.П. Вулканические акустические сигналы диапазона 0.5–10 Гц в атмосфере и их связь с взрывным процессом. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГПУ, 2003. 90 с.
- Фирстов П.П., Сторчеус А.В. Акустические сигналы, сопровождающие извержение вулкана Ключевской в марте–июне 1983 года // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 66–80.
- Фирстов П.П., Широков В.А. Локализация корней вулканов Ключевской группы по сейсмологическим данным // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 113–117.
- Фирстов П.П., Адушкин В.В., Сторчеус А.В. Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого трещинного Толбачинского извержения в сентябре 1975 г. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 259. № 5. С. 1078–1081.
- Хренов А.П., Маханова Т.М., Богатилов О.А., Платэ А.Н. Результаты аэрокосмических исследований вулканов Камчатки (Ключевская группа вулканов) // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 3–20.
- Эртель Г. (мл.) Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007. 774 с.
- Bourseller Ph., Durieux J. Volcans des et des Hommes. 2001. 416 p.
- Carrigan C.R., Schubert G., Eichelberger J.C. Thermal and dynamical regimes of single- and two-phase magmatic flow in dikes // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № B12. P. 17.377–17.392.
- Chouet B., Saccorotti G., Martini M. et al. Source and path effects in the wave fields of tremor and explosions at Stromboli Volcano, Italy // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B7. P. 15129–15150.
- Delfa S.La., Patane G., Clocchiatti R. et al. Activity of Mount Etna preceding the February 1999 fissure eruption: inferred mechanism from seismological and geochemical data // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2001. V. 105. P. 121–139.

- Jaupart C.* Magma ascent at shallow levels // Encyclopedia of Volcanoes. San Diego, Toronto: Academic Press, 2000. P. 237–245.
- Lees J.M., Symons N., Chubarova O. et al.* Tomographic images of Kliuchevskoy volcano P-wave velocity // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series. 2007. V. 172. P. 293–302.
- Macdonald G.A.* Volcanoes. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1972. 510 p.
- Manga M.* Waves of bubbles in magmatic systems and lavas // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № B8. P. 17457–17465.
- Manga M., Stone H.A.* Interactions between bubbles in magmas and lavas: effects of deformation // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1994. V. 63. P. 267–279.
- Ozerov A.Yu.* The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2000. № 95. P. 65–79.
- Ozerov A.Yu.* Periodicities in the dynamics of the volcanic eruptions in Kamchatka // 32nd International Geological Congress. Florence, Italy. Abstracts. Part 1. 2004. P. 614.
- Ozerov A.Yu., Konov A.S.* Regularities the dynamics of the Klyuchevskoy volcano eruption // Proceeding Kagoshima International Conference of Volcanoes. Japan. 1988. P. 63–65.
- Ozerov A.Yu., Firstov P.P., Gavrilov V.A.* Periodicities in the dynamics of eruptions of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series. 2007. V. 172. P. 283–291.
- Privitera E., Sgroi T., Gresta S.* Statistical analysis of intermittent volcanic tremor associated with the September 1989 summit explosive eruptions at Mount Etna, Sicily // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2003. V. 120. P. 235–247.
- Rittmann A.* Vulkane und ihre tatigkeit. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1960. 336 p.
- Sparks R.S.J.* The dynamics of bubble formation and growth in magmas: a review and analysis // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1978. V. 3. P. 1–37.
- Utnasin V.K., Abdurakhmanov A.I., Anosov G.I. et al.* Types of magma foci of island arc volcanoes and their study by the method of deep seismic sounding of Kamchatka // Volcanoes and Tectonosphere. Tokai University Press. 1976. P. 123–137.
- Vergnolle S., Jaupart C.* Separated two-phase flow and basaltic eruptions // J. Geophys. Res. V. 91. 1986. P. 12842–12860.
- Vergnolle S., Jaupart C.* The dynamics of degassing at Kilauea volcano, Hawaii // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 2793–2809.
- Vergnolle S., Mangan M.* Hawaiian and Strombolian Eruptions // Encyclopedia of Volcanoes. San Diego, Toronto: Academic Press, 2000. P. 447–461.
- Wallis Graham B.* One-dimensional two-phase flow. New York, Panama: McGraw-Hill Book Company, 1969. 408 p.

The Mechanism of Basaltic Explosions: Experimental Modeling

A. Yu. Ozerov

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

Abstract—An instrument package for simulating basaltic eruptions (IPSBE) with a height of 18 m has been developed for investigating the processes that occur during Strombolian eruptions. The device follows the geometrical ratio between the actual plumbing system of a volcano, with the ratio of conduit diameter to conduit height being 1 to 1000. For the first time in physical modeling studies, we created conditions in which a moving gas-saturated model liquid enters the conduit; this enabled us to study bubble nucleation, expansion, and coalescence, the generation and transformation of gas structures, and the kinetic features shown by the evolution of the gas phase. These experiments revealed a novel (previously unknown) flow pattern of two-phase mixtures in a vertical column, viz., a cluster flow that involves the regular alternation of compact clusters of gas bubbles that are separated by a fluid that does not involve a free gas phase. It is shown that the liquid, bubble, cluster, and slug flow patterns are mutually transformed under certain conditions; they are polymorphous modifications of a gas-saturated liquid moving in a vertical pipe. The data thus acquired suggested a new model for the gas–liquid movement of a magma melt in a conduit: depending on the type of gas–liquid flow behavior at the vent, the crater will exhibit different types of explosive activity, including actual explosions.